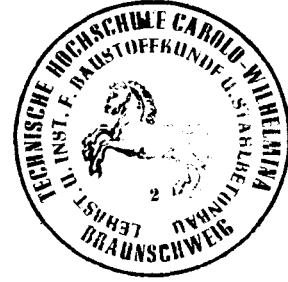


INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY



Abschlußbericht

Zum Verhalten von massigen Beton-  
strukturen im Hochtemperaturbereich

von

Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

Akad. OR. Dr.-Ing. U. Schneider

Juni 1977

Untersuchung im Auftrage der Kernforschungsanlage Jülich  
GmbH, Az.: 187/409 800 Nr. 21129

DK 536.45 : 624.012.4

Postsendungen:  
Posthofenstraße 52, 3300 Braunschweig  
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 22 81

Fernschreiber: 9 52 698 lbstb d

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

## 1. Einleitung

Im Rahmen einer amerikanischen Sicherheitsstudie (AIPA-Studie) sind umfangreiche Risikobetrachtungen an Hochtemperaturreaktoren durchgeführt worden mit dem Ziel, das Risiko derartiger Anlagen zu objektivieren. Dabei hat sich herausgestellt, daß das gleichzeitige Zusammentreffen mehrerer seltener Ereignisse u.a. zu einer unregelmäßigen Aufheizung des Reaktorcores führen kann, wobei je nach Störfallsituation Temperaturbeanspruchungen auftreten, die weit über die im normalen Reaktorbetrieb auftretenden Beanspruchungen hinausgehen. Zur Abschätzung des daraus resultierenden Risikos - z.B. infolge einer unplanmäßig auftretenden Leckage im Behältersystem - sind detaillierte Angaben über das Verhalten des HTR - Spannbetonbehälters unter extremen thermomechanischen Beanspruchungen erforderlich.

Die Temperaturen im Reaktorcore betragen 24 Stunden nach Eintritt der hypothetisch angenommenen Störfallsituation etwa 2000 bis 3000° C, so daß für die Betonstrukturen des Behälters partiell mit Beanspruchungen von rd. 1000° C zu rechnen ist. Es stellt sich somit die Frage, welche baustoffkundlichen bzw. materialbezogenen Konsequenzen für den HTR-Spannbetonbehälter daraus resultieren. Die Fragestellung umfaßt sowohl die generellen Aspekte der thermischen Stabilität der einzelnen Materialien bzw. deren Komponenten im Hochtemperaturbereich als auch ingenieurmäßige Betrachtungen über die zu erwartenden Änderungen in den mechanischen Eigenschaften von Stahl und Beton bzw. Stahl-/Spannbeton unter diesen Bedingungen.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts sollen insbesondere folgende Punkte untersucht und - sofern es möglich ist - geklärt werden:

- a) Welche Angaben sind in der AIPA - Sicherheitsstudie über die thermische Stabilität der verwendeten Materialien - insbesondere von Beton - vorhanden und stimmen diese Angaben mit den in Deutschland vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnissen überein ?

- b) Welche Aussagen werden über die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Beton und Stahl unter hoher Temperatur gemacht und sind diese Angaben auf hiesige Materialien übertragbar ?
- c) Sind die angenommenen Versagensmechanismen für den HTR-Spannbetonbehälter realistisch oder sind andere Versagensformen im Hochtemperaturbereich denkbar ?

Grundlage der Berichterstattung sind von der KFA-Jülich in Auszügen zur Verfügung gestellte Berichte der AIPA-Studie. Im einzelnen lagen folgende Unterlagen vor:

- AIPA-Studie Band I; Band III, 4 - 20 bis 26; Band III, 4 - 144 bis 155; Band IV, A2 - 31, A2 - 33 bis 35; Band IV, 4 - 31 bis 39; Band VI, 4 - 45 bis 48; Band VIII, Comment 11
- General Atomic Standard Safety Analysis Report (GASSAR), Kap. 5.4
- General Atomic, Modelle 4 und 5
- Barsell et. al., S. 9 bis 19

## 2. Zur Frage der thermischen Stabilität von Beton und Stahl bei extremer Temperatureinwirkung

Die mit der thermischen Stabilität der in Frage stehenden Materialien zusammenhängenden baustoffkundlichen Fragen sind in den vorliegenden Berichten nur sehr pauschal behandelt. Soweit der Beton betroffen ist, wird davon ausgegangen, daß bei Erreichung von rd.  $1000^{\circ}\text{C}$  eine Desintegration des Materials in Sand, Zuschlag und Zement eintritt und der Beton in Abständen von 30 Minuten in Schichten von etwa 5 cm Dicke zerstört wird. Dieser Überlegung kann grundsätzlich zugestimmt werden, allerdings ist zu beachten, daß die Desintegration oder besser gesagt, die Dehydratation des Betons bereits bei wesentlich niedrigeren Temperaturen beginnt und somit partiell auch schon früher als angegeben mit Strukturveränderungen und damit verbunden Veränderungen der mechanischen Eigenschaften zu rechnen ist.

Bei einer thermischen Beanspruchung portlandzementgebundener Betone laufen in der Bindemittel- und in der Zuschlagphase bekanntlich eine ganze Reihe von Umwandlungen und Reaktionen ab, die zu erheblichen Strukturänderungen und - wie oben erwähnt - damit verknüpft, zu entscheidenden Veränderungen der mechanischen Eigenschaften führen. Es handelt sich dabei, abgesehen von den vornehmlich im Zuschlaggestein auftretenden Kristallumwandlungen, hauptsächlich um Abbaureaktionen, d.h. der Reaktionsablauf ist durch einen Gewichtsverlust gekennzeichnet. Diese Abbaureaktionen laufen vorzugsweise im Zementstein, entsprechend der vorliegenden Gesteinsart aber auch im Betonzuschlag ab, wobei Entwässerungs- und Dekarbonatisierungsreaktionen im Vordergrund stehen.

Der bei den im Beton ablaufenden Abbaureaktionen eintretende Gewichtsverlust kann mit Hilfe einer Thermowaage registriert und in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit aufgezeichnet werden. Die Thermogramme einiger portlandzementgebundener Betone sowie einiger Zuschläge sind auf Bild 1 dargestellt. Die Versuche wurden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von  $5 \text{ K min}^{-1}$  und je nach dem zu erwartenden Gewichtsverlust mit Einwaagen zwischen 80 und 120 g durchgeführt. Der Druck im Probenraum betrug, abhängig von der anfallenden Dampf- bzw. Gasmenge, zwischen 0,5 und 20 Torr.

In Bild 1 ist der Gewichtsverlust in Prozent für verschiedene Betone in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Die meßtechnischen Parameter wie Aufheizgeschwindigkeit, Einwaage und Druck waren bei allen Versuchen annähernd gleich, so daß die Kurven direkt untereinander vergleichbar sind. Man erkennt, daß der quantitative Verlauf bei jedem der hier diskutierten Betone unterschiedlich ist, doch zeigen alle Kurven auch gewisse qualitative Gemeinsamkeiten. Die Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenartigen Betonen ist durch die Bindemittelphase - den Zement-

stein - bedingt, der bei allen untersuchten Betonen aus hydratisiertem Portlandzement bestand. Die Zuschlagstoffe selbst zeigen mit Ausnahme des Kalziumkarbonats nur einen geringen, im Falle des Leichtzuschlags (Leca) sogar einen nicht meßbaren Gewichtsverlust.

Typisch für den Verlauf der Thermogramme der Betonproben sind nur schwach ausgeprägte Reaktionsstufen. Versuche haben gezeigt, daß auch bei Änderung der Versuchsparameter, wie Einwaage, Probenabmessungen etc. der Kurvenverlauf im wesentlichen unverändert bleibt. Entscheidend für das Fehlen ausgeprägter Stufen ist die Tatsache, daß die bei der Zersetzung freiwerdenden gasförmigen Reaktionsprodukte - im wesentlichen Wasserdampf - zu einer Druckerhöhung an der Reaktionsfront (Autoklaveffekt) und damit im allgemeinen zu einer Verlangsamung der Reaktion führen. Die Verminderung des Druckes in der Thermowaage durch Evakuieren bewirkt lediglich eine Verschiebung der Kurve zu niedrigeren Temperaturen, weil die Zersetzungsprodukte laufend abtransportiert werden und somit eine Veränderung der Reaktionsgleichgewichte stattfindet. Die Saugleistung der Pumpe reicht jedoch nicht aus, um die momentane Druckerhöhung an der Reaktionsfront zu verhindern. Selbst bei einer weitaus höheren Saugleistung kann der freiwerdende Wasserdampf durch Diffusionsbehinderung im Porensystem nur verzögert entweichen, was zu der beobachteten "Verschmierung" der einzelnen Reaktionsstufen führt.

Nach Bild 1 ist für den Normalbeton etwa mit folgendem Reaktionsablauf zu rechnen: Zunächst verdampft das an der Oberfläche und in den größeren Poren befindliche Wasser. Es folgt im Temperaturbereich  $> 100^{\circ}\text{C}$  bis etwa  $300^{\circ}\text{C}$  eine Entwässerung der Kapillarporen, verbunden mit einem stufenweisen Gelabbau ( $14\text{ \AA}$  Tobermorite, C-S-H I und C-S-H II). Der ausgeprägte endotherme Peak bei  $490^{\circ}\text{C}$  muß der Zersetzung des Kalziumhydroxids ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) in  $\text{CaO}$  und  $\text{H}_2\text{O}$  zugeordnet werden. Die Quarzinversion bei  $573^{\circ}\text{C}$  hat keinen Einfluß auf das Gewicht der Probe, erst der endotherme Peak bei  $785^{\circ}\text{C}$  ist wieder mit einem stärkeren Gewichtsverlust verbunden. Bei dieser Temperatur findet offensichtlich ein

weiterer Abbau der hydratisierten CSH-Phasen statt. Dazu parallel läuft eine Neubildung von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  ab, wie röntgenographische Untersuchungen gezeigt haben. Gleichzeitig ist der Abbau calcitischer Zuschlagbestandteile und die Zersetzung des im Zementstein unter Umständen vorhandenen Calciumkarbonats zu erwarten. Bei diesen Temperaturen ist das Betongefüge im übrigen praktisch zerstört, so daß die Untersuchungen nicht über  $1000^\circ\text{C}$  hinaus ausgedehnt wurden.

Aus dem Bild 1 geht hervor, daß ein Normalbeton mit quarzitischem Zuschlag bis  $1000^\circ\text{C}$  praktisch das gesamte Betonwasser (rd. 160 bis 200 lit je  $\text{m}^3$  Beton) abgibt, so daß das Material in der Tat einem haufwerksähnlichem Zustand mit relativ großer innerer Reibung zustrebt. Bei Betonen mit anderen Zuschlägen sind jedoch u.U. wesentlich höhere Gewichtsverluste denkbar, die teilweise aus dem Betonwasser zum anderen jedoch aus gasförmigen Zersetzungsprodukten der Zuschläge herrühren. Bei Serpentinbeton ist z.B. bis  $800^\circ\text{C}$  eine Wasserabgabe von 250 bis 300 lit. je  $\text{m}^3$  Beton zu erwarten.<sup>+) Die Verwendung von Kalksteinzuschlägen führt zu Gewichtsverlusten bis zu 36 %, d.h. je  $\text{m}^3$  Beton werden in Abhängigkeit von der Temperatur und Zeit rund 800 bis 850 kg Masse in Form von Wasser (150 bis 200 kg) und  $\text{CO}_2$  (650 bis 700 kg) freigesetzt. Das derartige Umsetzungen mit erheblichen Strukturveränderungen verbunden sind bedarf im Grunde genommen keiner weiteren Erläuterungen.</sup>

Soweit es die Strukturveränderungen von Stahl betrifft sei hier ergänzend zu den in der AIPA-Studie gefundenen Angaben erwähnt, daß sich der vorgesehene Linerstahl mit 0,2 % Kohlenstoff lange vor Erreichen seiner Schmelztemperatur bei  $1500^\circ\text{C}$  vom  $\alpha$  - Eisen in  $\gamma$  - Eisen umwandelt (Umwandlungsbereich  $721$  bis  $850^\circ\text{C}$ ), was naturgemäß neben der bekannten Änderung der magnetischen Eigenschaften mit deutlichen Veränderungen in der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität verbunden ist. Inwieweit die mechanischen Eigenschaften des Stahls von der  $\alpha$  -  $\gamma$  - Umwandlung beeinflusst werden, ist dagegen

---

<sup>+) Gesamtwasser = Anmachwasser + Kristallwasser</sup>

kaum bekannt. Entsprechende Ergebnisse technologischer Untersuchungen liegen praktisch nicht vor, d.h. die meßtechnisch gesicherte Temperaturgrenze bezüglich des Festigkeitsverhaltens von Baustählen kann ungefähr mit 700 °C angenommen werden. Über diese Grenze hinaus führende Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen sind dringend erforderlich.

### 3. Veränderungen von Beton und Stahl unter hohen Temperaturen

Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Beton und Stahl unter hohen Temperaturen ist in der AIPA-Studie nur bezüglich der temperaturabhängigen Festigkeitsverluste behandelt. Angaben über den Einfluß der Temperatur auf die Verformungseigenschaften sind demgegenüber praktisch nicht vorhanden, so daß im folgenden darauf auch nicht weiter eingegangen werden muß.

Die Hochtemperaturfestigkeit von Beton ist in der AIPA-Studie als Mittelkurve aus verschiedenen amerikanischen Untersuchungen angegeben und auf Bild 2 dargestellt. Gleichzeitig enthält das Bild 2 die Versuchsergebnisse anderer Autoren. Man erkennt daran, daß die Werte relativ gut übereinstimmen, allerdings ist zu beachten, daß die in der AIPA-Studie angegebenen Werte offenbar an der oberen Grenze der zum Vergleich herangezogenen Messungen liegen. Bezüglich der Übertragung solcher Angaben auf deutsche Verhältnisse wären hier also gewisse Vorbehalte anzumelden.

Über die Zugfestigkeit von Stählen sind in der AIPA-Studie die in Tabelle 1 angegebenen Werte zu finden.

Tabelle 1

Zugfestigkeit des Linerstahls A-537 in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperatur in °C	200	204	427	649	760	871
Zugfestigkeit in %	100	90	75	35	20	10

Vergleicht man diese Werte mit den auf Bild 3 angegebenen Meßergebnissen, so wird deutlich, daß die Baustähle St 37 und St 52 sich ungefähr so verhalten wie der Linerstahl A-537, wenngleich auch nicht deutlich wird, welche Zugfestigkeiten von diesen Stählen oberhalb  $700^{\circ}\text{C}$  tatsächlich noch erreicht werden. Wesentlich ungünstiger ist demgegenüber das Temperaturverhalten von Spannstählen zu beurteilen. Bild 3 zeigt deutlich, daß bei Temperaturen  $> 600^{\circ}\text{C}$  nahezu unabhängig von der Art des Spannstahles Festigkeiten von  $< 10\%$  der ursprünglichen Zugfestigkeit bei Raumtemperaturen zu erwarten sind. Diese Erkenntnis sollte bei vertieften rechnerischen Störfalluntersuchungen am SBB unbedingt beachtet werden.

Inwieweit die vorliegenden Meßergebnisse über die im allgemeinen mit  $600$  bis  $700^{\circ}\text{C}$  begrenzten Untersuchungsbereiche hinaus sinnvoll extrapoliert werden können ist allerdings nicht bekannt. Bei Störfallbetrachtungen wird man voraussichtlich somit zukünftig von relativ ungünstigen Grenzwerten ausgehen müssen (z.B. Zugfestigkeit  $\approx 0,0$  bei  $1000^{\circ}\text{C}$ ), sofern zwischenzeitlich keine ergänzenden Grundsatzuntersuchungen durchgeführt werden.

Angaben über physikalische Eigenschaften von Beton und Stahl (Kohlenstoffstahl), die in der AIPA-Studie zu finden sind enthält Tabelle 2. Die amerikanischen Angaben sind eigenen Werten gegenübergestellt, so daß diese Tabelle einen ungefähren Überblick über zu erwartende Unterschiede in den amerikanischen und deutschen Materialangaben vermittelt. Insgesamt gesehen sind die Unterschiede gering, allerdings wird deutlich, daß der Temperatureinfluß auf die physikalischen Eigenschaften des Betons bei den amerikanischen Angaben offenbar von vornherein vernachlässigt wird. Über die Zulässigkeit einer solchen Vereinfachung müßte in jedem Einzelfall gesondert entschieden werden, von einer generellen Vernachlässigung dieser Effekte kann jedoch nur abgeraten werden.



Tabelle 2

Physikalische Eigenschaften von Beton und Baustahl bei hohen Temperaturen

Quelle	Material	93° C			371° C			861° C		
		$\rho$	$\lambda$	$C_p$	$\rho$	$\lambda$	$C_p$	$\rho$	$\lambda$	$C_p$
AIPA Studie	Beton	2300	1,5	0,23	2300	1,5	0,23	2300	1,5	0,23
	Baustahl	7860	42	0,11	7860	37	0,14	7860	30	0,19
TU Braunschweig	Beton	2300	1,5	0,22	2260	1,0	0,28	2240	1,0	0,28
	Baustahl	7860	43	0,11	7760	36	0,14	7680	25	0,15

$\rho$  : Rohdichte in  $\text{kg/m}^3$

$\lambda$  : Wärmeleitfähigkeit in  $\text{kcal/m h K}$

$C_p$  : spez. Wärmekapazität in  $\text{kcal/kg K}$

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, daß die in der AIPA-Studie angegebenen Materialkennwerte ungefähr unseren eigenen baustoffkundlichen Erfahrungen entsprechen. Partiiell sind bei der Übertragung von Risikobetrachtungen auf hiesige Verhältnisse jedoch etwas geänderte Werte einzusetzen, um den speziellen werkstoffmäßigen Bedingungen besser Rechnung zu tragen. Die Zusammenstellung zeigt weiterhin, daß Materialkennwerte über 800° C hinaus praktisch nicht bekannt sind. Sofern diese bei zukünftigen Untersuchungen erforderlich werden, müßten entsprechende Studien durchgeführt werden. Andernfalls muß man bei den anzustellenden Risikobetrachtungen von relativ ungünstigen Grenzwerten ausgehen, z.B. indem man ab einer bestimmten Temperatur ein vollständiges Materialversagen unterstellt, selbst wenn dies in der Praxis nicht der Fall sein sollte.

#### 4. Versagensmechanismen des HTR-Spannbetonbehälters

In der vorliegenden Betrachtung wird davon ausgegangen, daß sich infolge eines hypothetischen Störfalles (Ausfall der Energieversorgung, Zusammenbruch der Reaktorkühlung etc.) der HTR-Behälter allmählich aufheizt, so daß 25 Stunden nach Eintritt des Störfalles mittlere Core-Temperaturen von etwa 1500° C erreicht werden. Der HTR-Behälter selbst ist dabei druckentlastet, d.h. durch entsprechende Vorkehrungen wird sichergestellt, daß sich kein Überdruck aufbaut. Eine ausführlichere Beschreibung dieser speziellen Störfallsituationen ist in der AIPA-Studie zu finden.

In der Studie wird dann davon ausgegangen, daß rund 13 Stunden nach Störfallbeginn die Stahlblechhalterungen der Linerisolierung im Deckelbereich des SBB versagen ( $T = 660^{\circ} \text{C}$ ), so daß der Liner spontan einer relativ hohen Temperatureinwirkung ausgesetzt ist. Nach 34 Stunden betragen dessen Temperaturen etwa 980° C. Es wird weiter angenommen, daß der Liner im wesentlichen infolge von Kriechen unter Eigengewicht zu diesem Zeitpunkt seine Tragfähigkeit verliert und der Spannbeton somit einer direkten Temperatureinwirkung unterliegt.

Als Folge der hohen Temperaturbeanspruchung wird eine zeitabhängige Zerstörung des Betons unterstellt. Danach desintegriert der Beton bei Überschreiten von  $1000^{\circ}\text{C}$  und fällt alle 30 Minuten durch Abplatzen (spalling) in Schichten von rd. 5 cm Dicke ab. Unter der ungünstigen Annahme, daß die vorausgesetzte "Zerstörungsgeschwindigkeit" konstant ist, ergibt sich nach 48 Stunden eine zerstörte Betonschicht von 1.20 bis 1.50 m Dicke, d.h. von der ursprünglichen Dicke des Behälterdeckels von 5,5 m sind noch gut 4.0 m vollkommen intakt. Aus diesem Ergebnis wurde geschlossen, daß innerhalb des betrachteten Zeitraums keine zusätzlichen Öffnungen, Risse o.ä., die eine Freisetzung von Spaltprodukten ermöglichen, am HTR-Behälter entstanden sind. Auf Bild 4 sind die einzelnen Phasen des geschilderten Versagensmechanismus schematisch dargestellt.

Das so dargestellte Versagensmodell erscheint zunächst als annehmbar und wird auch von den in den Abschnitten 2 und 3 enthaltenen Angaben über das Materialverhalten von Beton und Stahl weitgehend gestützt. Allerdings erscheinen einige Voraussetzungen bzw. Festlegungen die im Rahmen der Modellvorstellungen getroffen wurden relativ willkürlich, so daß bei detaillierter Betrachtung sicherlich zusätzliche Informationen erforderlich wären. Insbesondere sind der Versagenszeitpunkt der Stahlblechhalterungen, mehr noch jedoch das Kriechversagen des Liners in zeitlicher Hinsicht nur sehr grob angenommen. Im Hinblick auf die im Endzustand abzuschätzende Restdicke des Behälterdeckels wären genauere Angaben sicherlich von Vorteil.

Des weiteren ist zu beachten, daß gerade im Bereich der Durchführungen im Deckel des SBB mit Wärmebrücken und daraus resultierend mit erheblichen örtlichen Temperaturspannungen zu rechnen ist, die eine lokale Rißausbildung im Spannbeton bewirken können. Es ist zwar sehr unwahrscheinlich, daß

solche lokalen Risse sich in dem hier betrachteten Zeitraum weitläufig ausbreiten und schließlich durch den gesamten Querschnitt hindurch gehen, allerdings sollte auch nicht von vornherein unterstellt werden, daß Behälterleckagen dieser Art ausgeschlossen sind. Eine separate thermische und mechanische Analyse des Verhaltens solcher Durchführungen scheint unter diesem Gesichtspunkt ebenfalls als notwendig.

Eine weiterer Gesichtspunkt der in der AIPA-Studie keine Beachtung findet, ist die Notwendigkeit, die bei der thermischen Zersetzung des Betons freiwerdenden gasförmigen Zersetzungsprodukte abzuführen. Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, ist bei niedrigen Temperaturen das Ausdampfen des Betonwassers zu erwarten, dem sich im Hochtemperaturbereich z.B. weitere im Zuschlag ablaufende Dekarbonatisierungsreaktionen überlagern. Derartige Reaktionen hängen von den erreichten Temperaturen und Partialdrücken ab. Sie führen aber wie in Abschnitt 2 bereits ausgeführt, u.U. zu einer erheblichen Dampf- bzw.  $\text{CO}_2$ -Produktion, die ihrerseits nicht unerhebliche Auswirkungen auf den im HTR-Behälter herrschenden Gesamtdruck gewinnen kann.

Nach den vorliegenden Erfahrungen ist bei eindimensionaler Aufheizung von massigen, nicht vorgetrockneten Betonoberflächen mit rund  $2^\circ \text{C/min}$  eine maximale Ausdampfrate von etwa  $0,5 \text{ kg H}_2\text{O/m}^2\text{h}$  zu erwarten, d.h. aus einer  $10 \text{ m}^2$  großen Betonoberfläche werden in einer Stunde maximal  $5 \text{ kg}$  Betonwasser ausgedampft. Bei  $100^\circ \text{C}$  und  $1 \text{ at}$  nimmt dieser Betonwasserdampf ein Volumen von  $8,6 \text{ m}^3$  ein. Man wird also davon ausgehen müssen, daß sich bei einer Aufheizung des Reaktorcores aufgrund der thermischen Inkompabilitäten der Liner zunächst vom Beton geringfügig abhebt und sich bei Temperaturen  $> 100^\circ \text{C}$  in dem so entstandenen Spalt unter Sättigungsdruck stehender Betonwasserdampf ansammelt. Dadurch wird der Liner noch weiter ausgebeult,

so daß voraussichtlich eine membranartige Konfiguration entsteht, die jeweils an den Betonankern gehalten wird. Bei Temperaturen um  $180^{\circ}\text{C}$  beträgt der Spaltdruck etwa 9 at, d.h. bei weiterem Temperaturanstieg ist mit dem Abreißen der Anker zu rechnen (vgl. Bild 5).

Unterstellt man, daß der Liner infolge seiner Verankerung und der vielen Durchführungen an einer vollständigen Ablösung gehindert wird, sind bei  $320^{\circ}\text{C}$  Membranspannungen in Höhe der Zugfestigkeit des Liners denkbar. Unter diesen Bedingungen wird der Liner möglicherweise explosionsartig, wahrscheinlich jedoch durch örtliche Risse versagen, d.h. die Betonstrukturen werden schon relativ frühzeitig hohen thermischen Beanspruchungen unterliegen, so daß eine über die AIPA-Modellvorstellung hinausgehende Zerstörung des HTR-Behälters denkbar ist. Geht man davon aus, daß die Betonzerstörung infolge eines vorzeitigen Linerversagens etwa 10 h eher beginnt als in der AIPA-Studie angenommen, so ist unter Beibehaltung des angegebenen Zersetzungsmechanismus mit einer zusätzlich zerstörten Betonschicht von 100 cm Dicke zu rechnen, d.h. rund 40 % des ursprünglichen Deckelquerschnitts des HTR-Behälters sind nach diesen Vorstellungen als zerstört anzusehen.

Diese Prognose ist wesentlich pessimistischer als die der AIPA-Studie. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß der nach dem Linerversagen vorausgesetzte Zerstörungsmechanismus für Beton keineswegs zu ungünstig ist. Bei einem rund 2-stündigen Brand in einem Autobahntunnel wurden nach dem Ablöschen in der Spannbetondeckenplatte z.B. zerstörte bzw. abgeplatzte Betonzonen bis zu 25 cm Dicke festgestellt. Die in der Studie zugrundgelegte "Zerstörungsgeschwindigkeit" von 10 cm pro Stunde entspricht offenbar Werten die in ungünstigen Fällen auch in der Praxis auftreten können.

Ein weiterer baustoffkundlicher Aspekt der bisher noch nicht betrachtet wurde ist das Ablöschen von  $\text{CaO}$ . Geht man davon aus, daß ein Teil des Kalksteinzuschlags im Beton bei  $700^{\circ}\text{C}$  bis  $900^{\circ}\text{C}$  dekarbonatisiert ist, so ist bei Absinken der ursprünglichen Maximaltemperatur unter  $450^{\circ}\text{C}$  ein Löschvorgang bzw. die Bildung von Calciumhydroxid denkbar. Das Ablöschen des  $\text{CaO}$  ist mit einer erheblichen Volumenzunahme verbunden und man muß unterstellen, daß alle Betonzonen mit Maximaltemperaturen oberhalb  $700^{\circ}\text{C}$  bei einer vorausgesetzten Abkühlung durch diesen Mechanismus vollständig zerstört werden.<sup>+)</sup>  Die in der AIPA-Studie zugrundegelegte Temperatur von  $1000^{\circ}\text{C}$  für die vollständige Zerstörung von Beton wird durch diese Modellvorstellung also deutlich unterschritten.

Inwieweit solche Abkühlvorgänge bei der betrachteten Störfallsituation überhaupt relevant werden können ist allerdings nicht bekannt.

## 5. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht wurde aus baustoffkundlicher Sicht zum Verhalten eines HTR-Spannbetonbehälters unter Störfallbedingungen Stellung genommen. Grundlage der Arbeit ist die AIPA-Sicherheitsstudie, die im Rahmen amerikanischer Untersuchungen an Hochtemperaturreaktoren erstellt wurde. Insbesondere sollte zu Fragen

- der thermischen Stabilität von Beton und Stahl,
- des Materialverhaltens von Beton und Stahl im Hochtemperaturbereich und
- des Behälterversagens bei einer bestimmten Störfallsituation

Stellung genommen werden.

---

<sup>+)</sup>  Das Volumen des  $\text{CaO}$  vergrößert sich beim Löschvorgang um das 2.5-fache !

Die Untersuchungen haben ergeben, daß in der AIPA-Studie nur relativ wenige Angaben über die thermische Stabilität der genannten Materialien zu finden sind. An einigen konkreten Beispielen konnte gezeigt werden, daß die baustoffkundlichen Aspekte bei Störfallbetrachtungen an Bedeutung gewinnen, weil thermisch bedingte Veränderungen - z.B. im Beton - mit Stoffumwandlungen o.ä. verbunden sind, wodurch u.U. erhebliche Mengen an Wasserdampf bzw. Kohlendioxid freigesetzt werden. Die entstehenden Dämpfe oder Gase müssen kontrolliert abgeführt werden, da sonst mit der Entstehung hoher Drücke im System bzw. in Systemkomponenten zu rechnen ist.

Die in der AIPA-Studie angegebenen Materialkennwerte für Beton und Stahl im Hochtemperaturgebiet wurden mit den Ergebnissen eigener Untersuchungen verglichen. In einigen Fällen wurden Abweichungen zwischen den einzelnen Werten festgestellt, grundsätzlich können die angegebenen Tendenzen jedoch bestätigt werden. Es hat sich jedoch gezeigt, daß sowohl die amerikanischen als auch die hiesigen Materialuntersuchungen i.a. auf Temperaturen  $< 700^{\circ}\text{C}$  (bei Stahl) bzw.  $< 800^{\circ}\text{C}$  (bei Beton) begrenzt sind, so daß häufig Extrapolationen über mehrere 100 Grad erforderlich sind, um bestimmte Aussagen machen zu können. Da die temperaturabhängige Materialzerstörung von Beton und Stahl i.a. nicht als eine monotone Temperaturfunktion aufgefaßt werden kann, sind derartige Extrapolationen äußerst fragwürdig. Für genauere Untersuchungen ist ein solches Vorgehen grundsätzlich abzulehnen, so daß in so einem Fall entsprechende Grundsatzzuntersuchungen erforderlich werden.

Das für den HTR-Behälter angegebene Versagensmodell konnte in seinen Grundzügen bestätigt werden. Es wurde jedoch gezeigt, daß die Vernachlässigung bestimmter Hochtemperatureffekte in der AIPA-Studie zu nicht mehr hinreichend konservativen Aussagen geführt hat. Eine entsprechende Erweiterung des vorgelegten Versagensmodells hat zu wesentlich ungünstigeren Ergebnissen geführt. Man wird generell diesen Versagensmodellen zukünftig eine verstärkte Beachtung zukommen lassen müssen um sicherzustellen, daß durch zu grobe Vereinfachungen nicht mehr realistische Versagensabläufe prognostiziert werden. Eine Intensivierung der theoretischen und experimentellen Arbeiten auf diesem Gebiet dürfte langfristig gesehen nicht zu vermeiden sein.



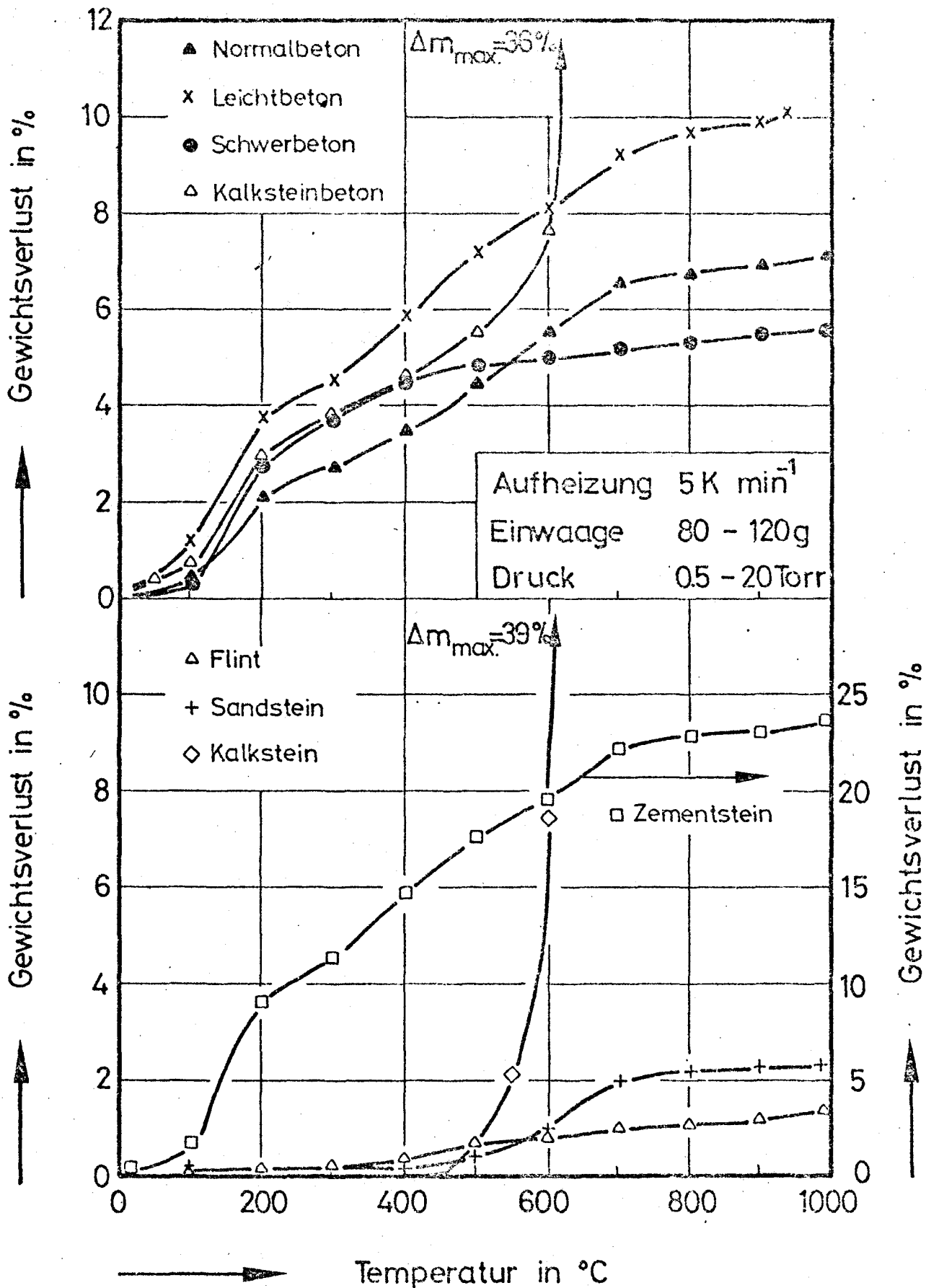


Bild 1: Gewichtsverlust einiger Betone und Zuschläge als Funktion der Temperatur

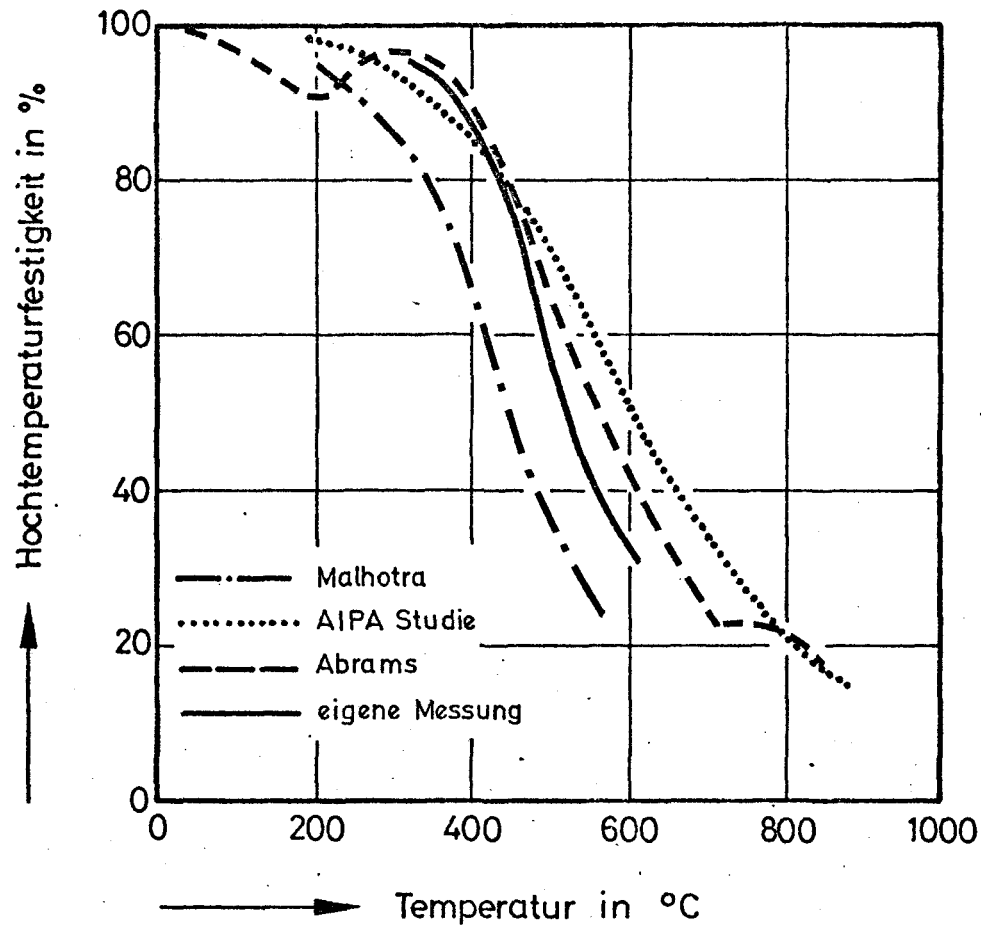


Bild 2: Hochtemperaturfestigkeit von Normalbetonen nach verschiedenen Untersuchungen

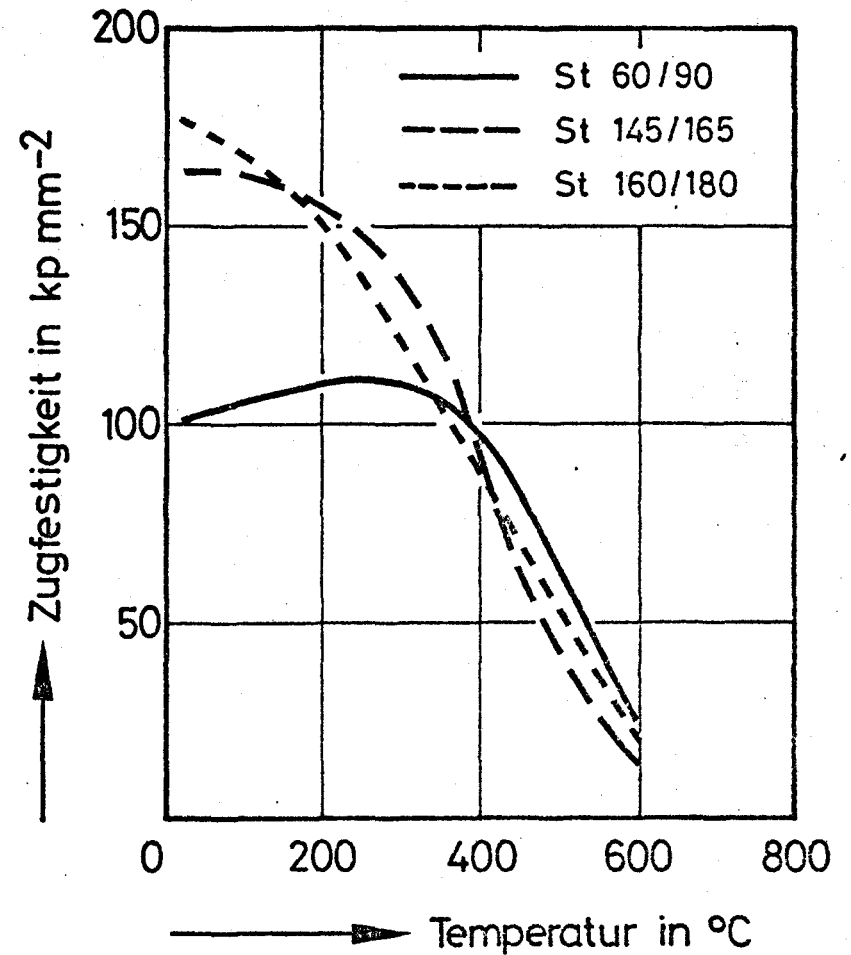
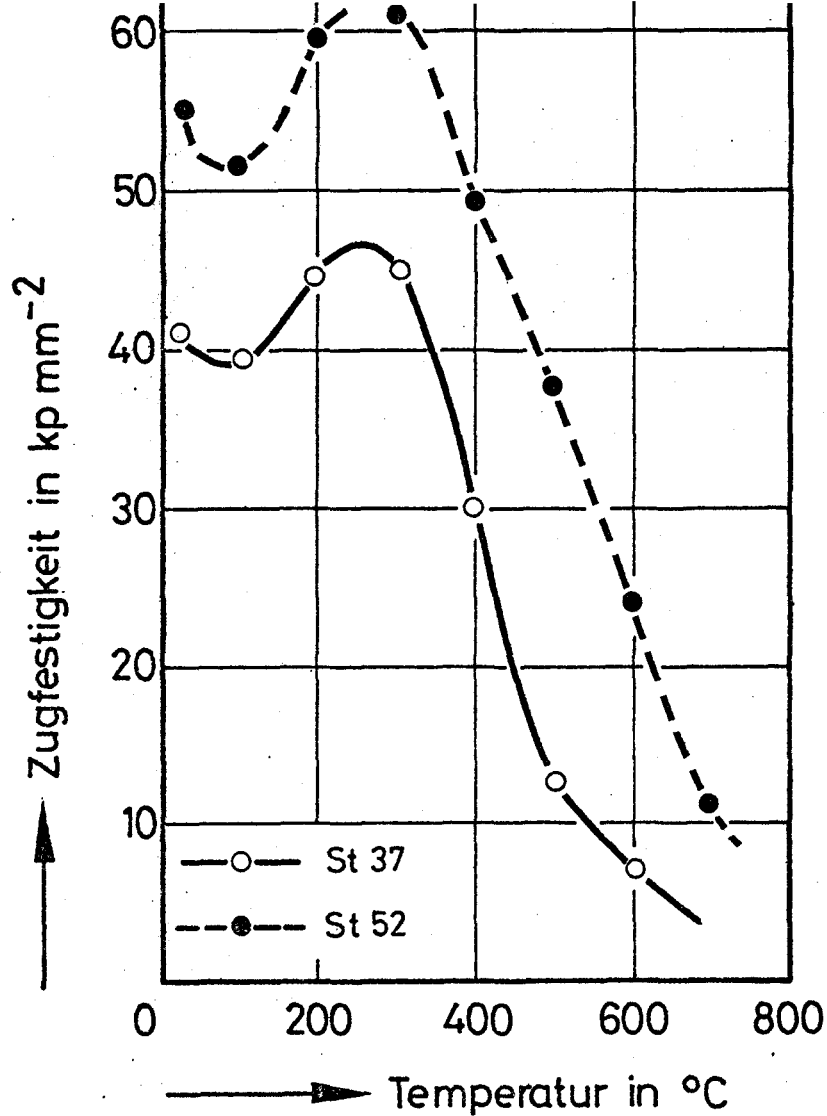


Bild 3: Zugfestigkeit von Bau- und Spannstählen bei hohen Temperaturen

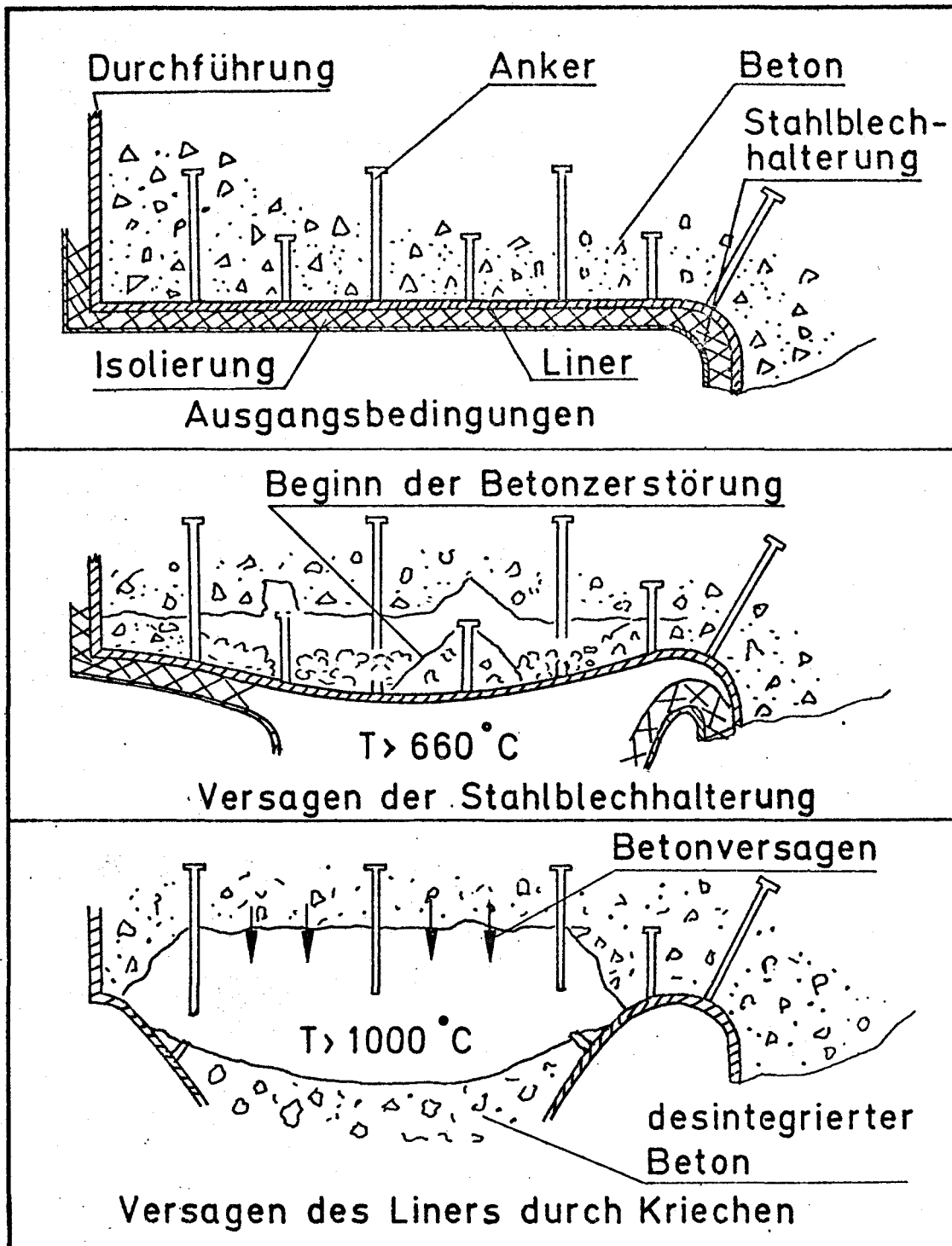


Bild 4: Versagensmechanismus des  
HTR-Behälters entsprechend  
der AIPA-Studie

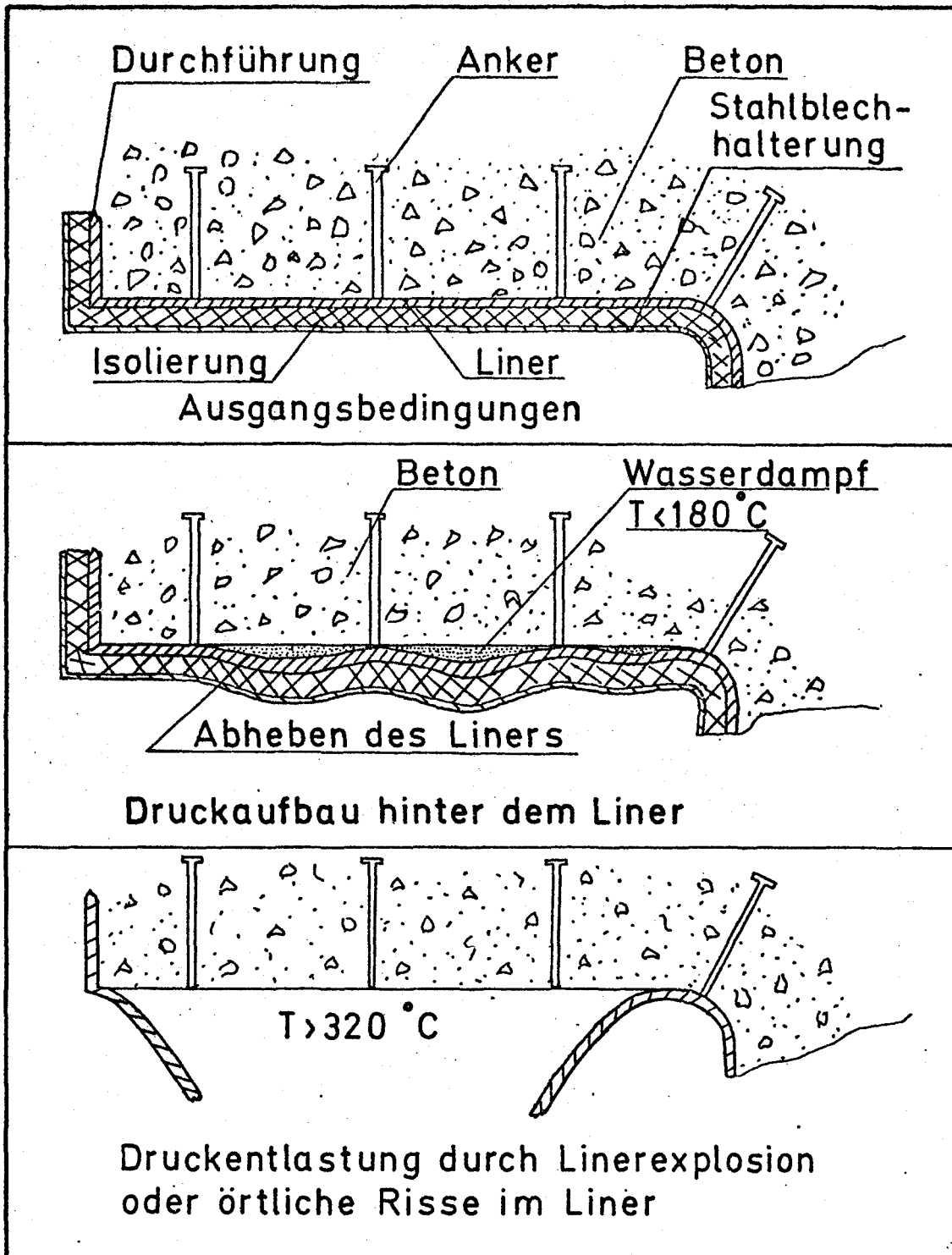


Bild 5 : Versagensmechanismus des  
HTR-Behälters nach dieser  
Studie